

Санкт-Петербургский государственный университет

Дуровин Кирилл Иванович

**ВЛИЯНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ НА РАБОТУ ЗРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ ЗДОРОВОГО ЧЕЛОВЕКА.**

Выпускная квалификационная работа по основной программе бакалавриата

Научный руководитель:
доцент кафедры высшей нервной
деятельности и психофизиологии
к.б.н В.Ю. Иванова

Санкт-Петербург

2018

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений в тексте	3
Введение	4
1. Обзор литературы	6
1.1. Контрастная чувствительность	6
1.2. Каналы обработки зрительной информации	9
1.3. Виртуальная среда и её использование для реабилитации	13
2. Материалы и методы исследования	17
2.1. Испытуемые	17
2.2. Ход эксперимента	17
2.3. Обработка	21
3. Результаты и обсуждение	23
4. Выводы	28
Список литературы	29

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ В ТЕКСТЕ

ЗВП – зрительные вызванные потенциалы

угл. мин – угловые минуты

цикл/угл. град – цикл на угловой градус

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все большее внимание уделяется разработкам методов использования погружений человека в виртуальную среду в терапевтических целях (Wilson et al., 1996; King et al, 2002; Burgess, 2002; Foreman et al., 2003; Brooks, 2010; Кузнецов и др., 2014; Ambron et al., 2018). Такие технологии позволяют стимулировать естественные для нахождения в природном пространстве физиологические процессы в организме человека в лабораторных и стационарных условиях. На основе упражнений в имитационных средах прорабатываются методы реабилитации пациентов с разнообразными дегенеративными расстройствами нервной системы, такими как заболевания шизофренического спектра, рассеянный склероз, депрессия и другие болезни (Муравьева и др., 2017, 2018). Воздействие такого рода тренингов приходится в первую очередь на зрительную систему человека и затрагивает разные её уровни и системы обработки, наиболее интересными из которых являются парво- и магно-каналы, обеспечивающие объектное и пространственное зрение. Данная работа является частью крупного исследования, посвященного разработке методов реабилитации пациентов с психоневрологической патологией, проводимого совместно лабораторией зрения института физиологии имени И.П. Павлова РАН и ИМЧ РАН на базе института мозга.

Для использования нового метода реабилитации пациентов необходимо понимать влияние погружений в виртуальную среду и на здорового человека. В психофизиологическом исследовании процессы обработки зрительной информации и изменения этих процессов в следствие предположительного влияния имитационной среды, происходящие в зрительной системе, можно обнаружить и изучить с помощью психофизических и электрофизиологических методов.

Целью данной работы была оценка влияния на парво- и магно-каналы зрительной системы здорового человека интерактивной виртуальной среды с помощью метода когнитивных зрительных вызванных потенциалов и измерения пороговой контрастной чувствительности.

Задачи исследования:

1. Анализ изменения амплитуды компонентов когнитивных вызванных потенциалов на зрительный стимул с определенной частотной и семантической характеристикой после курса погружений в виртуальную среду.
2. Анализ изменения контрастной чувствительности испытуемых после курса погружений в виртуальную среду.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Контрастная чувствительность

Любая визуальная картина, будучи сложной мозаикой изменения освещенностей – чередованием светлых и темных участков, может быть представлена в виде синусоидальных колебаний. Профили светимости таких синусоид представляют собой решетчатые паттерны, которые в зависимости от числа циклов чередования темных и светлых полос на фиксированный участок пространства характеризуются разной пространственной частотой. Чем больше полос приходится на единицу площади паттерна, тем выше его пространственная частота. Синусоидальные решетки с медленным изменением интенсивности света содержат низкие пространственные частоты. Решетки, в состав которых входит большое количество темных и светлых полос с малой шириной, т.е. интенсивность светимости меняется быстро, содержат высокие пространственные частоты. Разница в светимости темных и светлых полос определяет контраст решетки (Шиффман, 2003). В 1891 году Альберт Майкельсон предложил формулу для объективного расчета такого контраста:

$$K = L_{\max} - L_{\min} / L_{\max} + L_{\min},$$

где L_{\max} – максимальная яркость в изображении синусоиды, L_{\min} – минимальная яркость в изображении синусоиды (Муравьева и др., 2010).

При одинаковом значении контраста некоторые пространственные частоты воспринимаются четче других, что свидетельствует о разной чувствительности зрительной системы к разным частотам. Чем меньший контраст нужен для того, чтобы пространственные частоты были видимыми, тем выше чувствительность зрительной системы к этим частотам. Убедиться в этом можно, изучив Рис. 1. На данной иллюстрации контраст уменьшается снизу вверх одинаково для всех полос, однако у наблюдателя возникает ощущение, что не все полосы видны до самого конца, заметно, что у каждой полосы есть свой предельный контраст, при котором она еще видна. Максимальная чувствительность зрительной системы человека в норме приходится на диапазон средних пространственных частот от 1 до 7 цикл/угл. град. Причем максимум

изменяется в зависимости от средней яркости стимула и адаптации глаза. Предельный видимый диапазон пространственных частот начинается от практически нулевой частоты и доходит до 60 цикл/угл. град, что является самой высокой расчетной пространственной частотой (Шелепин и др., 2014).

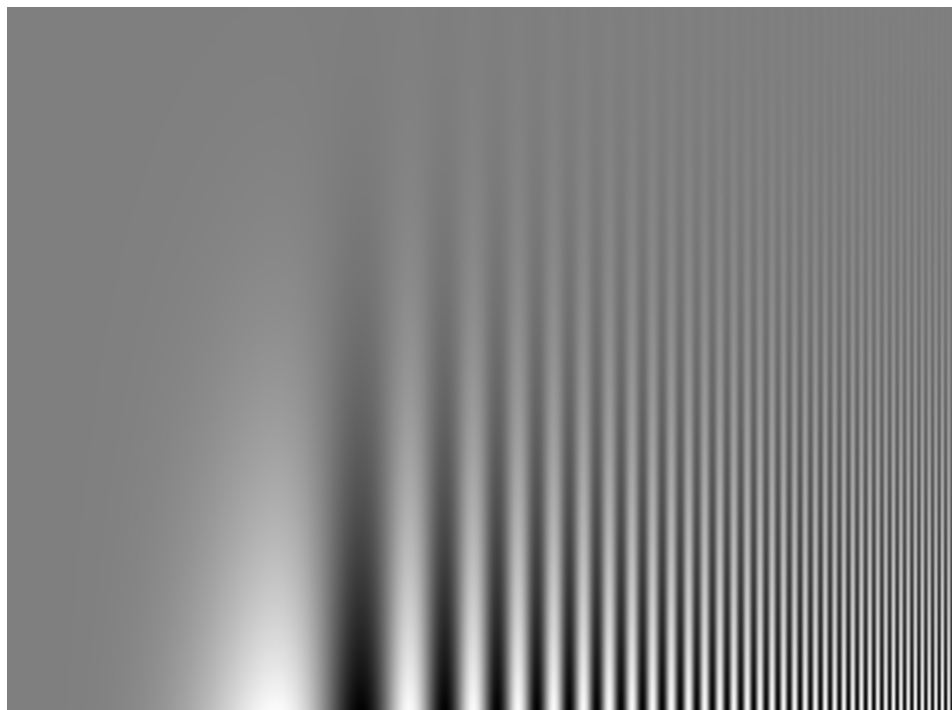


Рис. 1. Синусоидальная решетка с переменной пространственной частотой и контрастом. По оси абсцисс пространственная частота в циклах/угл град. По оси ординат контраст. (Шелепин, 2007)

Относительную чувствительность зрительной системы к разным пространственным частотам можно измерить, фиксируя по ответам испытуемого значения воспринимаемого порогового контраста для решеток с разной пространственно-частотной характеристикой. Пороговый контраст в данном случае - это контраст столь малой величины, при котором испытуемый только начинает различать решетку на фоне. Пороговые значения контраста решеток переводятся в контрастную чувствительность зрительной системы к различным пространственным частотам (контрастная чувствительность является обратной величиной пороговому контрасту). Для паттернов с низкими пространственными частотами порог контрастной чувствительности высок и чувствительность относительно низкая, поэтому для

различения необходим большой контраст. По мере увеличения пространственной частоты световой порог, необходимый для различения паттерна, понижается и повышается чувствительность. Однако для паттернов с очень высокими пространственными частотами величины световых порогов возрастают и чувствительность понижается (Рис. 2) (Шиффман, 2003). По результатам измерений строится график частотно-контрастной характеристики испытуемого. В качестве тестовых изображений в данной процедуре используются синусоидальные решетки с разной частотой, промодулированные по закону Гаусса, называемые решетками Габора (Шелепин и др., 1985; Шелепин, 2007).

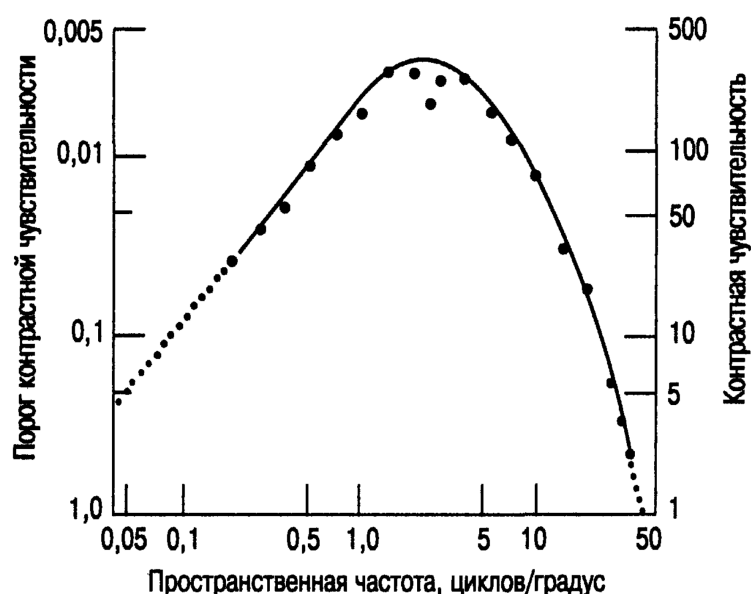


Рис. 2. Функция контрастной чувствительности.

На левой ординате отложены значения порогов восприятия контраста, соответствующие различению каждой частоты, на правой — значения, обратные световым порогам. На оси абсцисс отмечены пространственные частоты. (Шиффман, 2003)

Важно отметить, что при определении частотно-контрастной характеристики зрительной системы необходимо учитывать ряд факторов, влияющих на результаты процедуры измерения. Огромный вклад вносят острота зрения испытуемого (ухудшается передача высоких пространственных частот вследствие снижения фокусировки изображения на сетчатке) и расстояние до тестовых решеток, так как изменение удаленности приводит к изменению пространственной частоты в цикл/угл. град. Кроме того, огромное влияние оказывает сила освещенности, от которой зависит

диаметр зрачка и уровень адаптации. Так при низких уровнях освещенности чувствительность зрительной системы сдвигается в область низких пространственных частот (Шелепин и др., 1985; Шелепин, 2007).

В целом, чувствительность в норме зависит от ряда факторов, таких как рефракция, дифракция и абберрации глаза, яркость, ориентация и размер тестовых решеток, а также положение тестовых решеток в поле зрения – в центре поля зрения представлены в основном мелкие рецептивные поля настроенные на высокие частоты, а на периферии более крупные – воспринимающие низкие частоты. Кроме того, базируясь на работе нервных элементов зрительного анализатора, контрастная чувствительность зависит от их состояния. Так наблюдается сильное отклонение частотно-пространственной характеристики зрения от нормальной при некоторых заболеваниях нервной системы – болезнь Паркинсона (Pierg et al., 2000), рассеянный склероз (Муравьева и др., 2013; Муравьева и др., 2015), шизофрения (Шошина, Шелепин, 2013; Шошина и др., 2015), а также при диабете (Мошетова и др., 2012) и заболеваниях органов зрения разной природы, например, эндокринной офтальмопатии (Пантелеева, 2007).

Каналы обработки зрительной информации

Воспринимая сложное изображение, зрительный анализатор работает как система фильтров, настроенных на разные частотно-пространственные характеристики визуальной информации. Выделяя высокие и низкие пространственные частоты, параллельно происходит локальный и глобальный анализ изображения (Шелепин и др., 1985, 2009; 2011; 2014; Kveraga et al. 2007; De la Rosa et al., 2011). Существование в зрительной системе каналов узкополосной фильтрации было экспериментально подтверждено еще в конце 60х годов (Campbell, Robson, 1968). Эти каналы являются нейронными комплексами, чувствительными к разным пространственным частотам и обеспечивают первичную фильтрацию зрительной информации (Kaplan, 1986; Shapley, 1992; Куликовский и др., 1999). Нейронные комплексы каналов – это множество рецептивных полей с одинаковыми свойствами. Поля получают на входе сигнал в виде изображения на сетчатке, на выходе нейроны рецептивных полей преобразуют эту

информацию в импульсную активность таким образом, что каждое поле фильтрует изображение в какой-то узкой полосе пространственных частот (Бондарко и др., 1999).

При изучении ганглиозных клеток сетчатки еще в начале двадцатого столетия Поляк (Polyak, 1932) и Энрой-Кугель (Enroth-Cugell, 1952, 1953) выделили два главных типа ганглиозных элементов, которые сейчас классифицируют как α или М- и β или Р-клетки (Муравьева и др. 2013). α или М- (от magnocellular – магноцеллюлярный, т.е. крупноклеточный) клетки имеют крупный перикарион, аксон большого диаметра и немногочисленные, но сильно ветвящиеся дендритные деревья. β или Р- (parvocellular – парвоцеллюлярный, т.е. мелкоклеточный) клетки обладают перикарионом среднего размера и более узкими дендритными деревьями. Электрофизиологами было обнаружено, что оба морфологических типа клеток имеют рецептивные поля типа «центр-периферия». Крупные α -ганглиозные клетки имеют большие рецептивные поля с оппонентным (противоположным по знаку вызываемой реакции) окружением. На постоянное освещение они реагируют коротким быстрым ответом. Меньшие по размеру β -ганглиозные клетки сетчатки имеют более узкие поля с оппонентным окружением и демонстрируют длительный ответ на освещение (Смит, 2015). Имея проекции через слои латерального колленчатого тела в первичную зрительную кору ганглиозные клетки сетчатки формируют каналы первичной обработки зрительной информации.

В результате огромного числа морфологических и физиологических исследований на данный момент выделяют три основные группы каналов в зрительном анализаторе, обеспечивающие сенсорный вход в первичную зрительную кору: магно-, парво- и конеоцеллюлярный каналы. Так как принадлежащие этим системам ганглиозные клетки обладают различными физиологическими свойствами каналы имеют различия в контрастной, цветовой, яркостной и пространственно-временной настройке (Wiesel, Hubel, 1966; Kaplan, Shapley, 1986; Skottun, 2014; Зуева и др., 2017). Различными электрофизиологическими и психофизическими методами было зафиксировано, что зрительные каналы по-разному изменяются при старении, глаукоме, рассеянном склерозе, болезни Паркинсона и Альцгеймера, а также при заболеваниях

шизофренического спектра (Зуева и др., 2017). Восприятие пространственно-частотных характеристик зрительных стимулов обеспечивается главным образом магно- и парво-системами.

Магноцеллюлярную систему формируют М-ганглиозные клетки с проекциями через слои 1 и 2 латерального коленчатого тела в тонкий слой 4C α первичной зрительной коры (Смит, 2015). Ганглиозные клетки, относящиеся к магно-каналам, составляют около 10% всех ганглиозных клеток сетчатки (Муравьева и др, 2013). Обладая высокой скоростью проведения, нейроны этих каналов более чувствительны к низким пространственным частотам (до 3 цикл/градус) и высоким временным частотам (4 - 15 Гц), за счет чего играют ведущую роль в обработке информации о глобальной организации стимула, а также в процессах «предвнимания» и анализе движения наблюдаемого объекта (Шошина и др., 2014). Таким образом, магно-система обеспечивает пространственное зрение.

Парвоцеллюлярную систему образуют мелкие Р-ганглиозные клетки, проекции которых идут к парвоцеллюлярным слоям латерального коленчатого тела – слои 3, 4, 5 и 6, а затем к слою 4C β первичной зрительной коры (Смит, 2015). Нейроны этих каналов более чувствительны к высоким пространственным и низким временным частотам, а также имеют цветовую чувствительность в отличие от клеток магно-системы (Шошина и др., 2014). Парво-система отвечает за выделение объектов, восприятие мелких деталей, производит локальный анализ зрительного поля, обеспечивая таким образом объектное зрение.

Промежуточные пространственные частоты обрабатываются как за счет перекрытия работы магно- и парво-систем, так и благодаря работе других каналов зрительного анализатора, что обеспечивает максимальную чувствительность в области средних пространственных частот (Куликовский, Робсон, 1999).

Поздняя обработка зрительной информации происходит по двум потокам и начинается на уровне первичной зрительной коры с разделения на дорсальный и вентральный

пути. Дорсальный, традиционно называемый путем «где?» или «как?» ассоциирован с движением, представлением о локализации объекта, использованием визуальной информации для оценки досягаемости объектов и достижения видимых предметов руками. Дорсальный путь направляется к задней части теменной доли коры. Вентральный путь, называемый «что?», связан с процессом распознавания формы, представлением об объекте, так называемый «канал распознавания». Этот путь ассоциирован с процессами обработки в нижней части височной доли коры. Исходящие из первичной зрительной коры дорсальный и вентральный потоки первоначально относили к соответственно магно- и парво-каналам, однако было показано, что область V4 вторичной зрительной коры (относящейся к вентральному пути) включает клетки не только парво-, но и магно-системы. В свою очередь средневисочная область (область МТ) дорсального потока имеет значительную проекцию парво- и конео-систем. Учитывая данные особенности, тесты, оценивающие функции, обслуживаемые дорсальным и вентральным потоками, не являются достаточно адекватными для селективной оценки работы магно- и парво-каналов (Зуева и др., 2017).

Обладая дифференцированной чувствительностью к различным пространственным частотам, магно- и парво-каналы могут быть продиагностированы с помощью психофизических, например, измерение контрастной чувствительности (визоконтрастометрия) и электрофизиологических методов, например, регистрацией зрительных вызванных потенциалов в ответ на предъявление стимулов с различным контрастом или пространственной и темпоральной частотой. Обладающая чувствительностью к низким пространственным частотам и слабому контрасту, магно-система может быть связана с показателями воспринимаемого порогового контраста для решеток с низкими частотами. Парво-система, в свою очередь, будет играть ключевую роль в восприятии тестовых решеток с высокими пространственными частотами. Таким образом, наличие проблем в одной из этих систем будет проявляться в отклонениях значений контрастной чувствительности от нормы для определенных частот. Подобные отклонения фиксируются у больных с расстройствами шизофренического спектра (Шошина и др., 2013, 2014, 2015; Муравьева и др., 2017) и рассеянным склерозом (Муравьева и др., 2008, 2013, 2015) и связываются с

нарушениями в работе зрительных каналов. Однако визоконтрастометрия не является достаточно чувствительным методом для регистрации небольших изменений в работе каналов, например, в следствии ухудшения по причине болезни или наоборот улучшения в ходе терапии. Кроме того, метод основывается на фиксации ответов испытуемого, что вносит определенный уровень погрешности. Более объективным методом оценки работы отдельных систем зрительного анализатора является регистрация вызванных потенциалов на зрительный стимул. Предъявляя испытуемому стимулы с определенной характеристикой пространственной частоты и контраста, можно получить картину потенциалов, отражающую процессы обработки в тех или иных каналах. Кроме того, различное время реагирования нейронов и разная скорость проведения сигнала по магно- и парво-каналам определяют специфический тайминг вносимых этими системами компонентов зрительных вызванных потенциалов, в связи с чем они могут идентифицироваться в одной и той же записи ЗВП, что позволяет оценивать вклад селективного ослабления зрительных каналов по изменению морфологии ответа (Шошина и др., 2014).

Виртуальная среда и её использование для реабилитации

Как термин виртуальная среда имеет достаточно широкое варьирование трактований (и вариантов характеристик на основе которых можно её определить) в зависимости от области, в контексте которой рассматривается данный феномен. Для физиологических исследований виртуальную среду можно обозначить как специально смоделированные условия, в которых у человека возникает ощущение присутствия в искусственном мире. Появление чувства присутствия может зависеть от ряда факторов, относящихся как к характеристикам среды, так и характеристикам человека. В качестве основного фактора можно выделить наличие обратной связи, обеспечивающей контроль пользователя за сенсорным потоком, а также дающей возможность манипуляции элементами виртуальной среды (Добычина, 2013; Величковский, 2014, 2016).

Использование виртуальной среды в биомедицинских исследованиях помогает решить большое количество методических затруднений. Так появляется возможность

исследовать физиологические процессы происходящие в организме человека в условиях намного шире по разным параметрам, чем просто лабораторные. Например, для того, чтобы проверить справедливость знаний о работе клеток отвечающих за пространственную ориентацию в гиппокампе крыс применительно к гиппокампу человека, в начале 2000х годов были проведены исследования с использованием виртуальных сред, схожих с видеоиграми. Это позволило поместить исследуемых людей в сложное по ориентационной структуре виртуальное пространство большой площади в условиях лаборатории. При этом в процессе навигации регистрировалась активность мозга испытуемых, что невозможно в условиях реальных прогулок на местности (King et al, 2002; Burgess, 2002).

Технологии виртуальной среды активно используются для реабилитации людей с различными заболеваниями. Так с помощью погружений в виртуальную среду, подробно копирующую территорию больницы, пациентка с амнезией была обучена поиску маршрута вокруг реабилитационного блока. В течение двух недель она изучала территорию в виртуальном пространстве и после смогла ориентироваться на реальной местности (Brooks, 2010). Подобное обучение ориентации проводилось и в исследованиях передачи пространственной информации из виртуальной в реальную среду для детей с физическими недостатками (Рис. 3) (Wilson et al., 1996; Foreman et al., 2003). Необычным подходом является лечение больных, испытывающих фантомные боли в отсутствующих конечностях. Пациент проходит курс погружений в виртуальную среду, в которой в режиме реального времени видит «свои» неповрежденные конечности, движения которых согласованы с движениями неповрежденных частей конечностей. После таких процедур больные испытывают значительное снижение фантомной боли (Ambron et al., 2018). Для реабилитации пациентов перенесших инсульт японской компанией Nintendo Co., Ltd. была создана технология помогающая восстанавливать двигательную активность с помощью сеансов виртуальной игры, в которой больные наблюдают движения своих конечностей в имитационной среде (Saposnik et al., 2010).

В контексте данной работы необходимо выделить применение технологий виртуальной среды в области исследований физиологии зрения. До развития данных технологий использовались только сравнительно простые визуальные стимулы, которые показывались неподвижно сидящему испытуемому. Однако еще Джордж Гибсон (Гибсон, 1988) поднимал вопрос о том, что в естественных условиях зрение это процесс активный, требующий от наблюдателя возможности взаимодействия с рассматриваемой сценой. Именно в виртуальной реальности наблюдатель может активно контактировать со средой, которую он анализирует. В последнее время методы, основанные на виртуальной среде, все чаще используются для изучения зрительной перцепции (Муравьева и др., 2017).



Рис. 3. Пример изображения из видеоряда виртуальной среды, использованной для обучения пространственной ориентации детей с физическими недостатками. (Foreman et al., 2003)

Задавая определенные характеристики при разработке имитационной реальности, можно создать условия, воздействующие на определенные части зрительного анализатора или стимулирующие конкретные этапы обработки визуальной информации. Например, для стимуляции каналов узкополосной фильтрации – магно- и парвоцеллюлярных комплексов – необходимо подготовить визуальную составляющую, содержащую определенный диапазон пространственных частот. Такой динамичный

набор стимулов создается с помощью специальной цифровой обработки интересующего видеоряда. Подобранные под конкретное исследование характеристики виртуальной среды позволяют снизить количество неучтенных факторов эксперимента, которые могут играть ключевую роль в искажении результатов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытуемые

В исследовании принимали участие 20 человек в возрасте от 20 до 25 лет. Испытуемые были поделены на две группы по 10 человек. Первая - экспериментальная - включала в себя 5 мужчин и 5 женщин. Вторая - контрольная группа - состояла из 4 мужчин и 6 женщин. Все испытуемые не имели черепно-мозговых травм, психоневрологических и зрительных патологий, с остротой зрения не менее 0,9, либо скорректированной до не менее 0,9.

Процедура исследования соответствовала этическим нормам Хельсинской декларации всемирной медицинской ассоциации. Информационное согласие было подписано каждым испытуемым.

Ход эксперимента

Исследование экспериментальной группы проходило в три этапа. Первый представлял из себя первичное исследование с помощью электрофизиологических и психофизических методов: регистрация вызванных потенциалов на зрительный стимул и измерение пороговой контрастной чувствительности – визоконтрастометрия. На втором этапе испытуемых исследование с помощью методик, использованных на первом этапе для обнаружения возможных изменений. Контрольная группа не получала курса сеансов взаимодействия с виртуальной средой. На обеих группах испытуемых проводились одинаковые исследования. Регистрация показателей испытуемых контрольной группы соотносилась с графиком экспериментальной группы – повторное исследование проводилось через 12 дней, после первичного.

Регистрация зрительных вызванных потенциалов проводилась с помощью наборов визуальных образов, стимулирующих преимущественно либо парво-, либо магно-системы зрительного анализатора. Эти стимулы представляли собой изображения, для

обработки которых использовался метод цифровой вейвлетной фильтрации с целью создания двух групп изображений с разными пространственно-частотными характеристиками. Половина изображений содержала только высокочастотную часть спектра пространственных частот, а другая – только низкочастотную (Рис. 4). Соответственно, первая группа визуальных образов являлась стимулом для парво-, а вторая – для магно-системы. Фильтрация производилась путем свертки изображений с DoG-функцией (сокр. от Difference of Gaussians) – вейвлет-преобразованием, представляющим собой разность двух двумерных функций Гаусса с разной полушириной. Для выделения высоких пространственных частот использовался фильтр с максимальным значением пропускания на частоте 10 цикл/град, низких частот – 1 цикл/град. Кроме критерия в виде разных пространственно-частотных характеристик, изображения были также разделены на две группы по их смысловому содержанию: первая изображала живые объекты, вторая – неживые. Это давало возможность исследовать влияние на вызванные потенциалы семантической информации, содержащейся в изображениях. Таким образом, зрительные стимулы подразделялись на четыре категории: изображения живых и неживых объектов на высоких пространственных частотах и изображения тех же объектов на низких пространственных частотах. Каждая из этих групп состояла из 45 изображений, средняя яркость и контраст которых были одинаковы. Стимулы предъявлялись на электронно-лучевом мониторе Mitsubishi Diamond Pro 740 SB с кадровой частотой 100 Гц и разрешением экрана 1024 x 768. На мониторе осуществляли коррекцию гамма-функции экрана. Расстояние между монитором и глазами испытуемого составляло 1,5 м, размер предъявляемых изображений – 3 угл.град. Изображения предъявлялись в случайном порядке на 100 мс с интервалом в 1 с с помощью программы, разработанной на основе Голлин-теста на базе лаборатории физиологии зрения Института физиологии им. И.П. Павлова РАН. В задачу испытуемого входило как можно быстрее нажать на нужную кнопку мыши при возникновении изображения с определенной семантической характеристикой: на левую, когда видит объект живой природы и на правую, в случае объекта неживой природы. В качестве электрофизиологических данных регистрировались зрительные вызванные потенциалы, для записи которых был использован электроэнцефалограф фирмы «Мицар» с частотой дискретизации 250 Гц и

программа WinEEG. Регистрация электроэнцефалограммы производилась с помощью электроэнцефалографической шапочки Electrocap с 19-ю электродами, расположенными на поверхности головы испытуемого в соответствии с международной системой «10-20» в отведениях Fp1; Fp2; F7; F3; Fz; F4; F8; C3; Cz; C4; P3; Pz; P4; T3; T4; T5; T6; O1; O2. Референтные электроды располагались на мочках ушей (за референт принималось среднее по двум ушным электродам), а заземляющий электрод в лобной области. Параметры фильтров высокой и низкой частоты составляли соответственно 0,53 Гц и 30 Гц.

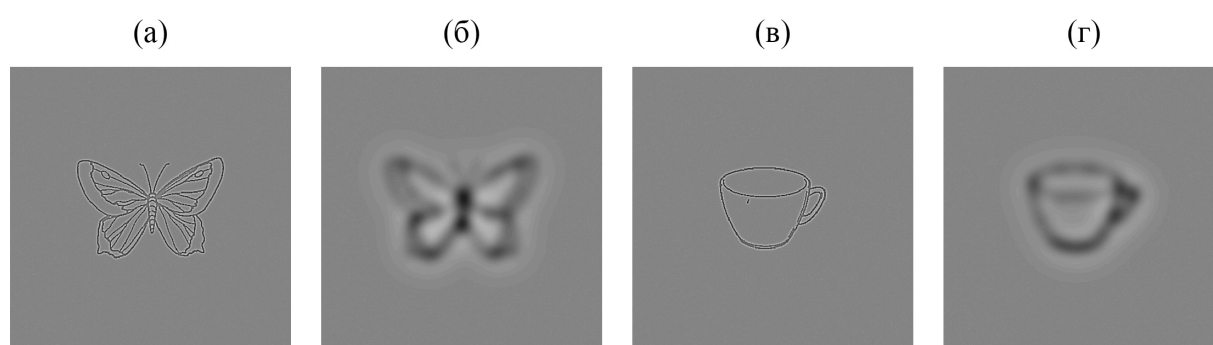


Рис. 4. Примеры четырех групп стимулов, использованных при записи зрительных вызванных потенциалов.

а – изображения живых объектов на высоких пространственных частотах

б – изображения живых объектов на низких пространственных частотах

в – изображения неживых объектов на высоких пространственных частотах

г – изображения живых объектов на высоких пространственных частотах

Для измерения пороговой контрастной чувствительности была использована программа «Эрготест 2.0», позволяющая измерять пороговые контрасты предъявляемых на экране монитора синусоидальных решеток Габора (Рис. 5) с заданными пространственными частотами, при помощи психофизического «метода лестницы». Решетки предъявлялись в пространственно-частотном диапазоне от 0,25 до 17 цикл/угл. град (0,25; 0,56; 1,12; 2,25; 4,5; 9,00 и 17,00 цикл/угл. град) с постепенным нарастанием контраста от 0 до 1. Визоконтрастометрия проводилась с помощью электронно-лучевого монитора Mitsubishi Diamond Pro 740 SB, использовавшегося для предъявления стимулов при записи вызванных потенциалов (характеристики описаны выше). Расстояние от экрана до глаз испытуемого составляло 1 м. В задачу обследуемого входило нажатие указательным пальцем правой руки (все испытуемые

являлись правшами) на левую кнопку «мыши» в момент появления на экране вертикальных линий и удержание её в зажатом состоянии до момента полного их исчезновения.

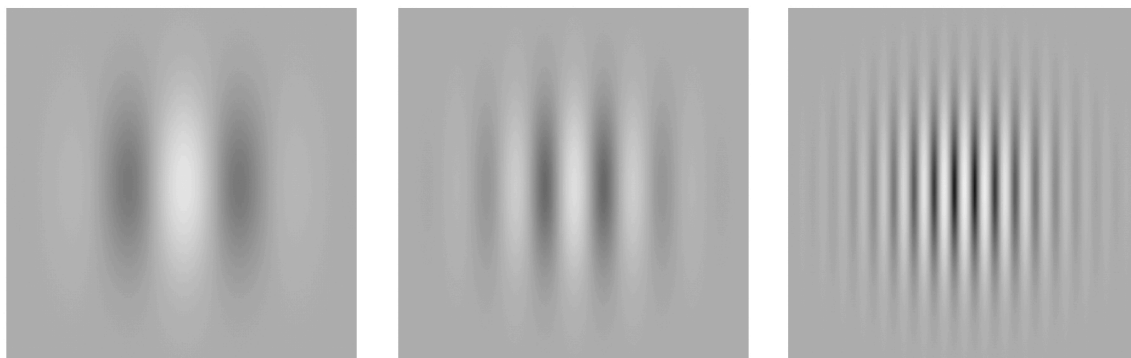


Рис. 5. Примеры решеток Габора из программы «Эрготест 2.0».

На втором этапе исследований использовалась интерактивная виртуальная среда, которая представляла собой видеоряд снятый от первого лица, имитирующий велопрогулку по ландшафтам с различным рельефом местности. Видео содержало ряд натуральных сцен, обработанных с помощью программного обеспечения, разработанного в лаборатории физиологии зрения. Обработка видеоряда позволила приблизить его пространственно-частотные характеристики к реальным. Натуральные сцены предъявлялись испытуемому на светодиодном мониторе Philips 55PFL4508T/60 с кадровой частотой 60 Гц, яркостью 350 кд/м² и разрешением экрана 1920x1080 при угловом размере 46.7 градусов (121x68 см, расстояние до глаз - 140 см). Для создания ощущения присутствия у испытуемого использовался синхронизированный с системой подачи видеоряда кардиотренажер типа велотренажер, уровень сопротивления вращения педалей которого изменялся в зависимости от рельефа виртуального ландшафта. Перед началом сеанса испытуемому давалась задача для концентрации внимания на видеоряде – производить счет определенных объектов, встречаемых во время велопрогулки (автомобили, дорожные знаки, люди). Продолжительность сеанса сенсомоторной нагрузки в виртуальной среде составляла 15 минут. Сеансы проводились десять дней по графику: пять дней раз в день, два дня без сеансов, пять дней раз в день. Интенсивность нагрузки устанавливалась экспериментатором перед

началом тренинга. Выбиралась минимальная нагрузка, существующая в настройках программы, этот уровень сложности был одинаковым для всех испытуемых.

По окончании курса сеансов сенсомоторной нагрузки в виртуальной среде проводилось повторное обследование испытуемых с помощью методик, использованных на первом этапе. Повторное обследование проходила и контрольная группа.

Обработка

Для анализа электроэнцефалографических данных – зрительных вызванных потенциалов выделяли эпоху продолжительностью в 500 мс. Эпоха анализа была разделена на четыре временных окна: 90–160, 160–250, 250–350, 350–500 мс. В данных интервалах анализировались компоненты вызванных потенциалов (Рис. 6). В пределах указанных для анализа временных окон фактическое временное окно могло немного изменяться, поэтому для каждой области мозга выбирался более точный временной интервал. Анализ ЗВП производился только для отведений: Fz; C3; Cz; C4; P3; Pz; P4; T3; T4; T5; T6; O1; O2. Для каждого отведения в каждом временном окне находили значения амплитуды, соответствующие пикам основных компонентов вызванного потенциала (максимум для позитивных волн и минимум для негативных волн). Амплитуды компонентов сравнивались в записях первичных и повторных обследований экспериментальной и контрольной групп. Оценка статистической достоверности различий амплитуд производилась с помощью непараметрического критерия Вилкоксона в программе Statistica. Результаты считались достоверными при $p < 0,05$.

Изменение уровня контрастной чувствительности испытуемых обеих групп анализировалось в пространственно-частотном диапазоне от 0,25 до 17 цикл/угл. град (0,25; 0,56; 1,12; 2,25; 4,5; 9,00 и 17,00 цикл/угл. град) от низких до высоких пространственных частот. Сравнивались пары данных «эксперимент первичные / эксперимент повторные»; «контроль первичные / контроль повторные»; «контроль первичные / эксперимент повторные»; «контроль повторные / эксперимент повторные»

с помощью критерия Манна-Уитни в программе Statistica. Порог статистической достоверности составил 5%, $p > 0,05$.

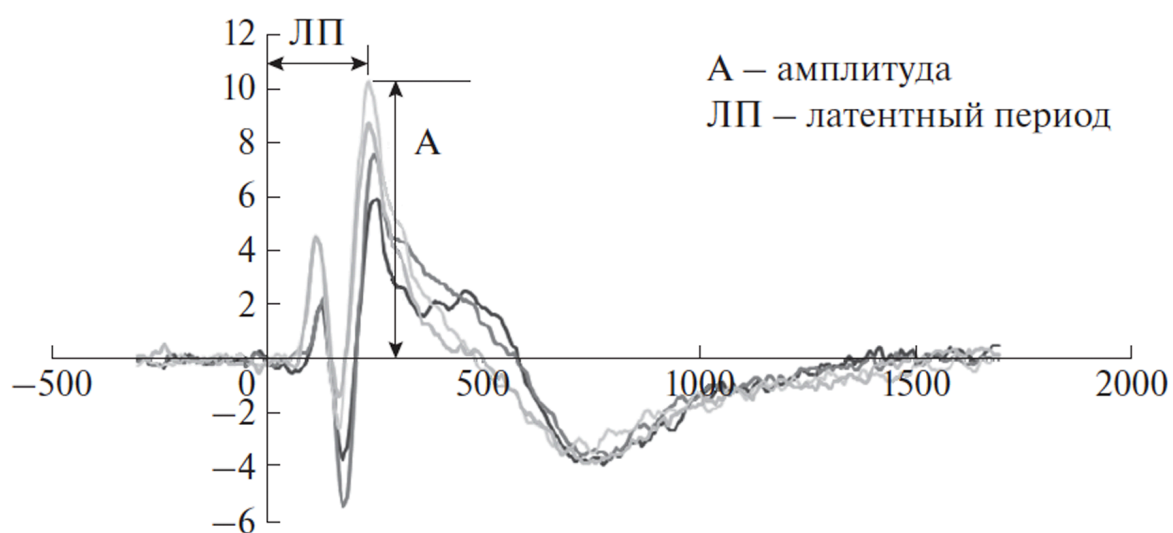


Рис. 6. Схема измерения амплитуды (мкВ) и латентных периодов (мс) компонентов вызванных потенциалов.
(Моисеенко и др., 2016)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По завершении экспериментальной части исследования были получены следующие данные: пороговая контрастная чувствительность и зрительные вызванные потенциалы на четыре вида стимулов для экспериментальной и контрольной групп по первичному и повторному исследованию.

Контрастная чувствительность

По результатам статистического анализа пар данных «эксперимент первичные / эксперимент повторные»; «контроль первичные / контроль повторные»; «контроль первичные / эксперимент повторные»; «контроль повторные / эксперимент повторные» с помощью критерия Манна-Уитни (порог статистической достоверности составил 5%, $p > 0,05$) значимых различий не было выявлено ни в одной из сравниваемых пар.

По результатам первичного измерения наблюдалось некоторое расхождение в контрастной чувствительности испытуемых, чье зрение было скорректировано очками или линзами, по сравнению с испытуемыми с нормальным зрением. Такое же расхождение наблюдалось и при повторном измерении, однако эта разница в обоих случаях не оказалась достоверной.

Вызванные потенциалы на зрительный стимул

Было проведено сравнение амплитуды компонентов вызванных потенциалов (на четыре группы стимулов) полученных во время первичного и повторного исследования экспериментальной и контрольной групп. В качестве примера на Рис. 7 приведены графики ЗВП на стимулы являющиеся изображениями живых и неживых объектов содержащих высокие пространственные частоты, зарегистрированные у одного из участников экспериментальной группы во время первичного (Рис. 7А) и повторного (Рис. 7Б) исследования.

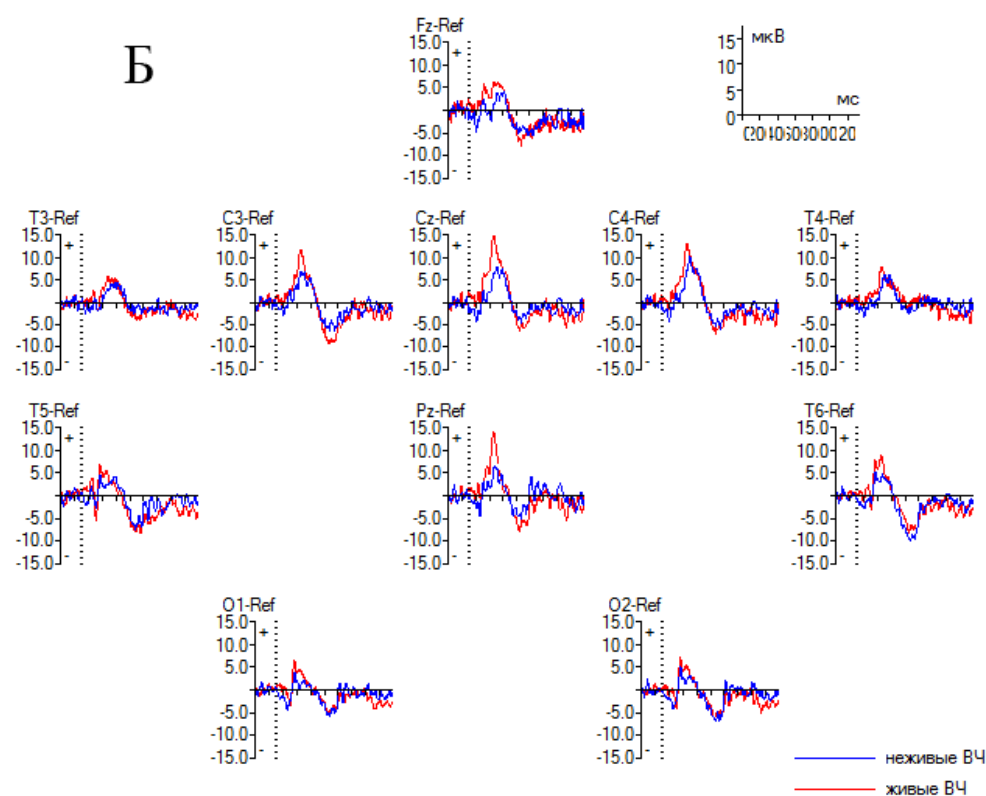
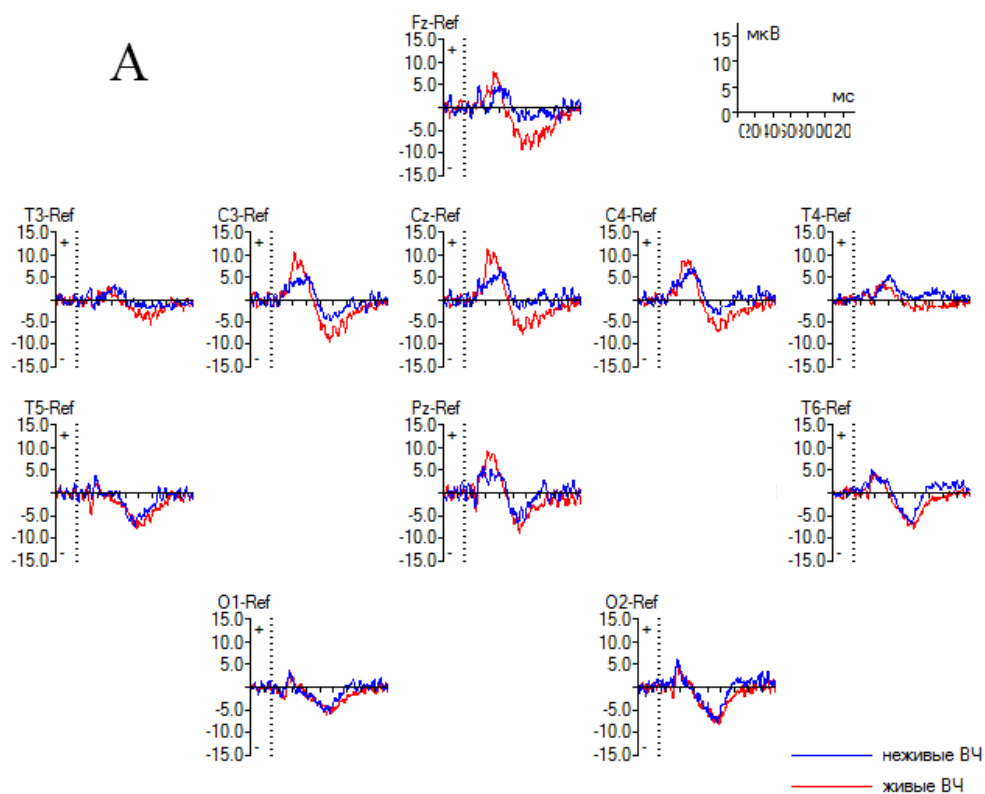


Рис. 7. Пример графиков ЗВП на изображения живых и неживых объектов, содержащих высокие пространственные частоты (ВЧ), зарегистрированные у одного из испытуемых экспериментальной группы во время первичного (А) и повторного (Б) исследования. По оси абсцисс амплитуда в мкВ. По оси ординат время в мс.

В экспериментальной группе у испытуемых после курса погружений в виртуальную среду выявлены изменения в амплитуде компонентов вызванных потенциалов в ответ на стимулы разной пространственной частоты. Так обнаружено достоверное увеличение амплитуды раннего компонента P100 (N100) в затылочно-височных отведениях (T5, T6) в ответ на стимулы содержащие низкие частоты и в отведении Cz в ответ на изображения живых объектов на обоих видах частот. Достоверная разница выявлена также для компонента P170 (N170) в височных отведениях (T3, T4) и центральной лобной области (Fz) на стимулы с изображениями живых объектов на низких и неживых объектов на высоких частотах. Такая же разница отмечена для компонента P250 (N250) в в затылочно-височных отведениях (T5, T6). Амплитуда позднего компонента P350–P500 достоверно увеличилась в ЗВП на низкочастотные изображения живых объектов и высокочастотные изображения неживых в центральной области (C3, C4). Такое же увеличение данного компонента зафиксировано в ЗВП на изображения неживых объектов с высокими частотами в центральной (Cz, C4), лобно-височных (T3, T4) и затылочно-височных (T5, T6) областях. Статистически значимые изменения амплитуды компонентов ЗВП на четыре группы стимулов, появившиеся после курса занятий в виртуальной среде у испытуемых экспериментальной группы, показаны на Рис 8.

При изучении зрительных вызванных потенциалов, полученных в первичном и повторном исследовании испытуемых контрольной группы, достоверных изменений амплитуды компонентов не обнаружено.

Таким образом, проанализировав результаты электрофизиологических и психофизических измерений у контрольной группы статистически значимых изменений между данными первичного и повторного исследования не выявлено. Отсутствие зарегистрированных изменений в работе зрительной системы людей данной группы может быть связано с тем, что испытуемые не получали курса специальной стимуляции виртуальной средой.

Обе методики, использованные в данной работе – измерение пороговой контрастной чувствительности и анализ компонентов ЗВП – фиксируют состояние работы магно- и парво-каналов зрительной системы. Выявленные изменения электрофизиологических данных при отсутствии достоверной разницы в результатах визоконтрастометрии до и после курса тренировок в виртуальной среде у экспериментальной группы может быть связано с разной чувствительностью методов. Кроме того, данные регистрации ЗВП не зависят от моторной реакции испытуемого и являются более объективными.

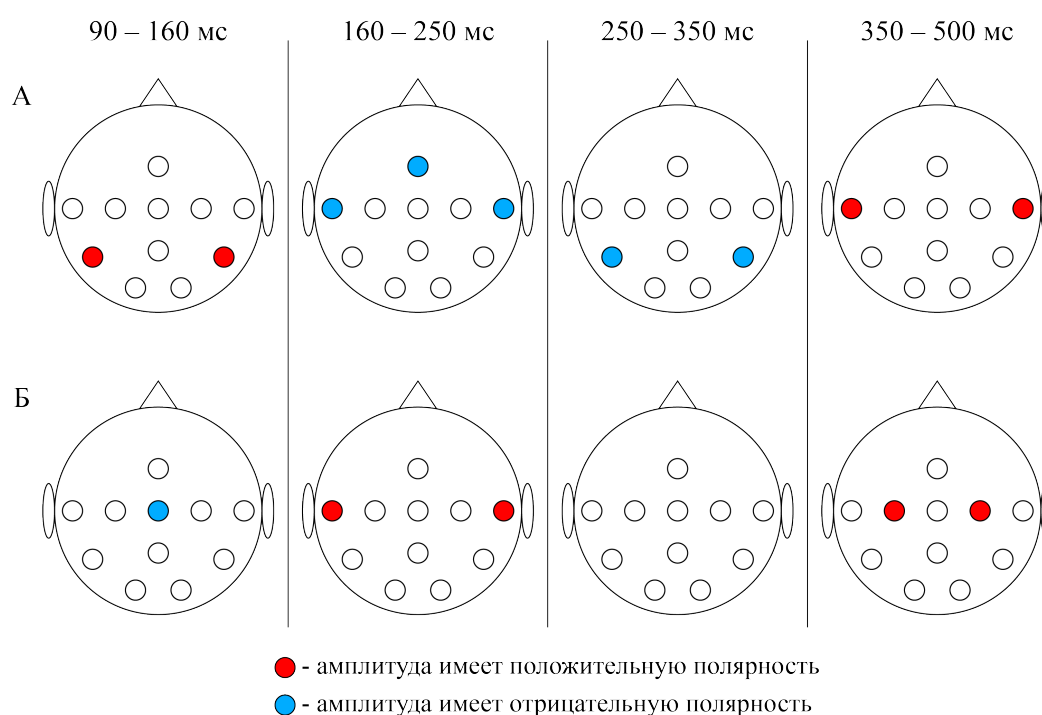


Рис. 8. Локализация электродов, в которых были отмечены достоверные изменения амплитуды ЗВП после тренировок в виртуальной среде у экспериментальной группы (отмечены цветом).

А – амплитуда зависит от пространственной частоты изображения

Б – амплитуда зависит от семантики изображения

У испытуемых экспериментальной группы обнаружены достоверные различия данных электрофизиологических измерений до и после курса взаимодействия с виртуальной средой. Выявленные изменения в амплитудах ранних и поздних компонентов ЗВП при выполнении задания по дифференциации стимульных изображений живых и неживых объектов могут быть опосредованы положительными изменениями в работе магно- и парвоцеллюлярной систем под воздействием виртуальной среды. Таким образом,

можно обозначить благотворное влияние тренингов на функционирование каналов узкополосной фильтрации зрительного анализатора, то есть и на процессы анализа визуальной информации – пространственное и объектное зрение. Стимулирующий эффект, использованной в данном исследовании виртуальной среды, можно применять для реабилитации людей с проблемами функционирования магно- и парво-систем. Такие методики уже прорабатываются сотрудниками нашей лаборатории в качестве дополнения к лечению пациентов с параноидной формой шизофрении. В исследованиях С.В. Муравьевой (Муравьева и др., 2017, 2018) оценивается изменение работы магно- и парво-каналов у больных шизофренией в ходе курса тренингов взаимодействия с виртуальной средой, основанной на использовании экранов разного размера для подачи стимулирующего видеоряда. В результате этих работ выявлено достоверное положительное изменение пороговой контрастной чувствительности на низких и высоких пространственных частотах, а также значительные повышения амплитуды компонентов ЗВП в ответ на изображения живых и неживых объектов.

ВЫВОДЫ

1. Сравнительный анализ амплитуды компонентов когнитивных вызванных потенциалов на зрительный стимул определенной частотной и семантической характеристики выявил достоверные изменения ранних и поздних компонентов ЗВП у испытуемых экспериментальной группы после курса взаимодействия с виртуальной средой. У испытуемых контрольной группы достоверных изменений амплитуд компонентов не обнаружено.
2. Анализ данных визоконтрастометрии испытуемых не выявил достоверных изменений контрастной чувствительности между первичным и повторным обследованием в экспериментальной и контрольной группах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарко В.М., Данилова М.В., Красильников Н.Н., Леушина Л.И., Невская А.А., Шелепин Ю.Е. Пространственное зрение. – СПб.: Наука, 1999. – 218 с.
2. Величковский Б.Б. Психологические факторы возникновения чувства присутствия в виртуальных средах // Национальный психологический журнал, 2014. № 3. С. 31–38.
3. Гибсон Дж. Экологический подход к зрительному восприятию. – М.: Прогресс, 1988. – 464 с.
4. Добычина Н.В. Реальное и виртуальное в цифровом человеко-машинном взаимодействии // Экономические и гуманитарные исследования регионов, 2013. № 5 С. 86–94.
5. Зуева М.В. Физиология ганглиозных клеток и нейродегенеративные заболевания сетчатки // Российский офтальмологический журнал, 2014. Т. 7. № 3. С. 102–107.
6. Зуева М.В., Цапенко И.В., Лантух Е.П., Маглакелидзе Н.М. Функциональные исследования зрительных каналов: клинические аспекты // Вестник офтальмологии, 2017. Т. 133. № 2. С. 114–119.
7. Зуева М.В., Цапенко И.В., Лантух Е.П., Маглакелидзе Н.М. Функциональные исследования зрительных каналов: физиологические основы // Вестник офтальмологии, 2017. Т. 133. № 1. С. 97–102.
8. Кузнецов П.П., Чеботаев К.Ю., Узденов Б.И. Медицина и виртуальная реальность 21 века: создание синтетических сред, тренды, инновации // Врач и информационные технологии, 2014. № 3. С. 72–80.
9. Куликовский Я.Дж., Робсон Э. Пространственные, временные и хроматические каналы: электрофизиологическое обоснование // Оптический журнал, 1999. Т. 66. № 9. С. 37–52.
10. Моисеенко Г.А., Шелепин Ю.Е., Хараузов А.К., Пронин С.В., Чихман В.Н., Вахрамеева О.А. Классификация и распознавание изображений живой и неживой природы // Оптический журнал, 2015. Т. 82. № 10. С. 685–693.
11. Мошетьова Л., Аржиматова Г., Комаров А. Клинико-функциональные характеристики органа зрения при сахарном диабете // Врач, 2012. № 5. С. 24–27.

12. Муравьева С.В., Бисага Г.Н., Пронин С.В., Брякилева Т.В., Шелепин Ю.Е. Влияние продолжительности заболевания на изменения зрительных вызванных потенциалов и контрастной чувствительности у пациентов с рассеянным склерозом // Журнал высшей нервной деятельности, 2015. Т. 65. № 6. С. 1–10.
13. Муравьева С.В., Дешкович А.А., Шелепин Ю.Е. Магно- и парвосистемы человека и избирательные нарушения их работы // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова, 2008. Т. 94. № 6. С 637–649.
14. Муравьева С.В., Пронин С.В., Шелепин Ю.Е. Контрастная чувствительность зрительной системы человека // Экспериментальная психология, 2010. Т. 3. № 3. С. 5–20.
15. Муравьева С.В. Исследование функционального состояния магно- и парво-каналов зрительной системы человека: автореф. дис. канд. мед. наук. – СПб, 2013. – 18 с.
16. Муравьева С.В., Дешкович А.А., Шелепин Ю.Е. Магно- и парвосистемы человека и избирательные нарушения их работы // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова, 2008. Т. 94. № 6. С. 637–649.
17. Муравьева С.В., Пронина М.В., Моисеенко Г.А., Пневская А.Н., Поляков Ю.И., Кропотов Ю.Д., Пронин С.В., Шелепин Е.Ю., Шелепин Ю.Е. Исследование зрительных когнитивных нарушений при шизофрении на ранних стадиях заболевания и их коррекция при помощи интерактивных виртуальных сред // Физиология человека, 2017. Т. 43. № 6. С. 24–36.
18. Муравьева С.В., Фокин В.А., Ефимцев А.Ю., Шелепин Ю.Е. Пространственно-частотные каналы зрительной системы при рассеянном склерозе // Сенсорные системы, 2013. Т. 27. № 2. С. 130–143.
19. Муравьева С.В., Шелепин Ю.Е., Дешкович А.А. Зрительные вызванные потенциалы человека на шахматный паттерн разного контраста в условиях помехи при рассеянном склерозе // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова, 2004. Т. 90. № 4. С. 463–473.
20. Пантелеева О.Г. Современная концепция механизма развития нарушений зрительных функций при эндокринной офтальмопатии: автореф. дис. док. мед. наук. – М, 2007. – 46 с

21. Смит К. Биология сенсорных систем. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 583 с.
22. Шелепин Ю.Е. Руководство по биофизике. Ред. В.О. Самойлов. – СПб.: Политехника, 2007. – 287 с.
23. Шелепин Ю.Е., Борачук О.В., Пронин С.В., Хараузов А.К., Васильев П.П., Фокин В.А. Лицо и невербальные средства коммуникации // Петербургский психологический журнал, 2014. № 9. С. 1-43.
24. Шелепин Ю.Е., Колесникова Л.Н., Левкович Ю.И. Визоконтрастометрия. – Л.: Наука, 1985. – 103 с.
25. Шошина И.И., Шелепин Ю.Е. Контрастная чувствительность у больных шизофренией с разной длительностью заболевания // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова, 2013. Т. 99. № 8. С. 928–936.
26. Шошина И.И., Шелепин Ю.Е. Механизмы глобального и локального анализа зрительной информации при шизофрении. – СПб.: Издательство ВВМ, 2016. – 300 с.
27. Шошина И.И., Шелепин Ю.Е., Вершинина Е.А., Новикова К.О. Функциональные особенности магноцеллюлярной и парвоцеллюлярной систем при шизофрении // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Психология», 2014. Т. 27. № 4. С. 10–16.
28. Шошина И.И., Шелепин Ю.Е., Конкина С.А., Пронин С.В., Бендера А.П. Исследование парвоцеллюлярных и магноцеллюлярных зрительных каналов в норме и при психопатологии // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова, 2012. Т. 98. № 5. С. 657–664.
29. Ambrose E, Miller A, Kuchenbecker K.J., Buxbaum L.J., Coslett H.B. Immersive Low-Cost Virtual Reality Treatment for Phantom Limb Pain: Evidence from Two Cases // Frontiers in Neurology. 2018 Vol. 9. No. 67. P. 1–7.
30. Blakemore C., Campbell F.W. On the existence of neurones in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images // J Physiol. 1969. Vol. 203 No. 1. P. 237–260.

31. Brooks B.M., McNeil J.E., Rose D.F. Route Learning in a Case of Amnesia: A Preliminary Investigation into the Efficacy of Training in a Virtual Environment // Neuropsychological rehabilitation. 1999. Vol. 9. No. 1. P. 63–76.
32. Burgess N., Maguire E., O’Keefe J. The Human Hippocampus and Review Spatial and Episodic Memory // Neuron. 2002. Vol. 35. P. 625–641.
33. Campbell F.W., Robson J.G. Application of Fourier Analyses to the Visibility of Gratings // J. Physiol. 1968. Vol. 197. P. 551–566.
34. Croner L.J., Kaplan E. Receptive fields of P and M ganglion cells across the primate retina. // Vision Res. 1995. Vol. 35. P. 7–15.
35. De la Rosa S., Choudhery R.N., Chatziastros A. Visual object detection, categorization, and identification tasks are associated with different time courses and sensitivities // J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform. 2011. Vol. 37. P. 38–47.
36. Enroth-Cugell C. Spike frequency and flicker fusion frequency in retinal ganglion cells // Acta Physiol. Scand. 1953. Vol. 29. P. 19–21.
37. Enroth-Cugell C. The mechanism of flicker and fusion studied on single retinal elements in the dark adapted eye of the cat // Acta Physiol. Scand. 1952. Vol. 27. P. 1–67.
38. Foreman N., Stanton D., Wilson P., Duffy H., Spatial Knowledge of a Real School Environment Acquired From Virtual or Physical Models by Able-Bodied Children and Children With Physical Disabilities // Journal of Experimental Psychology. 2003. Vol. 9. No. 2. P. 67–74.
39. Kaplan E., Shapley R. The primate retina contains two types of ganglion cells, with high and low contrast sensitivity // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1986. Vol. 83. P. 755–757.
40. King J.A., Burgess N., Hartley T., Vargha-Khadem F. O’Keefe J. Human Hippocampus and Viewpoint Dependence in Spatial Memory // Hippocampus. 2002. Vol. 12. P. 811–820.
41. Kveraga K., Boshyan J., Bar M. Magnocellular projections as the trigger of top-down facilitation in recognition // J. Neurosci. 2007. Vol. 27. No. 13. P. 232–240.
42. Pieri V., Diedericha N.J., Raman C.G. Decreased color discrimination and contrast sensitivity in Parkinson’s disease // Journal of the Neurological Sciences. 2000. Vol. 172. P. 7–11.

43. Polyak C. A contribution to the cerebral representation of the retina // J. Comp. Neurol. 1932. Vol. 56. P. 541–617.
44. Polyak C. The main afferent fiber system of the cerebral cortex in Primates // Berkeley. 1932. P. 489–505.
45. Saposnik G., Mamdani M., Bayley M., Thorpe K.E., Hall J., Cohen L.G., Teasell R. Effectiveness of Virtual Reality Exercises in STroke Rehabilitation (EVREST): Rationale, Design, and Protocol of a Pilot Randomized Clinical Trial Assessing the Wii Gaming System // International Journal of Stroke. 2010. Vol. 5 P. 47–51.
46. Shapley R. Visual Sensitivity and Parallel Retinocortical Channels // Annual Review of Psychology. 1990. Vol. 41. P. 635-658.
47. Wiesel TN, Hubel D.H. Spatial and chromatic interactions in the lateral geniculate body of the rhesus monkey // J Neurophysiol. 1966. Vol. 29. No. 1. P. 115-156.
48. Wilson P.N., Foreman N., Tlauka M. Transfer of spatial information from a virtual to a real environment in physically disabled children // Disability and Rehabilitation. 1996. Vol. 18. No. 12. P. 633–637.